



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) , A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)

Manuel Roberto Puente Echeverría

Asesorado por el Ing. Miguel Arnoldo Lemus Gudiel

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_3Cl_3 \cdot H_2O$) , A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL ROBERTO PUENTE ECHEVERRÍA
ASESORADO POR EL ING. MIGUEL ARNOLDO LEMUS GUDIEL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jorgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Gerardo Antonio Ordóñez López
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) , A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha marzo de 2015.



Manuel Roberto Puente Echeverría



Guatemala, 24 de febrero de 2016.
Ref.EPS.DOC.130.02.16.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Ing. Rodríguez Serrano:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Manuel Roberto Puente Echeverría** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200714695**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_3Cl_3 \cdot H_2O$), A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)"**.

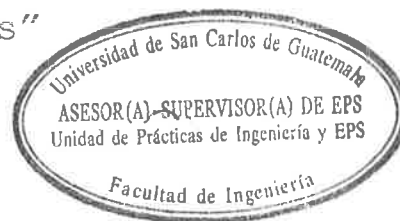
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
SAR/ra



Guatemala, 24 de febrero de 2016.
Ref.EPS.D.109.02.16.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_3Cl_3 \cdot H_2O$), A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)"** que fue desarrollado por el estudiante universitario Manuel Roberto Puente Echeverría, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor-Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

x 
Ing. Silvio José Rodríguez Serrano
Director Unidad de EPS


SJRS/ra



Guatemala, 14 de julio de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.034.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **014-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-

Solicitado por el estudiante universitario: **Manuel Roberto Puente Echeverría**.
Identificado con número de carné: **2007-14695**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

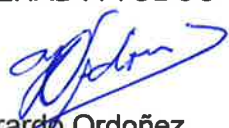
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_5Cl \cdot H_2O$), A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIO Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Miguel Arnoldo Lemus Gudiel**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Gerardo Ordoñez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.005.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química** del estudiante **MANUEL ROBERTO PUENTE ECHEVERRÍA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_3Cl_3 \cdot H_2O$), A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)"** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2017


Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG. 100.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO POR POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO ($Al_2(OH)_3Cl_3 \cdot H_2O$), A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COSTOS, LA DETERMINACIÓN DE SUS PUNTOS DE EQUILIBRIOS Y EL DESARROLLO DE SUS DOSIFICACIONES ÓPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA LAS ILUSIONES DE LA EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA (EMPAGUA)**, presentado por el estudiante universitario: **Manuel Roberto Puente Echeverría**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A

Dios	Por sus infinitas bendiciones y permitir que este proyecto se convierta en realidad.
Mis padres	Roque Manuel Puente Arredondo y Luz Patricia Echeverría de Puente, por ser el ejemplo a seguir para alcanzar mis metas, por su cariño sincero y ante todo, por el apoyo incondicional.
Mi hermana	Karen Lucrecia Puente Echeverría, por las experiencias vividas en un ambiente familiar y su gran ejemplo de lucha para alcanzar nuestras metas y así hoy poder ser colegas.
Mi novia	Ana Paola Mendía Zea, por compartir cada instante conmigo y mostrarme su amor verdadero. Por su apoyo incondicional y ante todo por su paciencia. Más aún, por ser mi compañera de vida, con la cual iniciamos ya nuestra historia, avanzando en todas las aventuras y sueños juntos.
Mis amigos	Adreana Hernández, José Carlos Sosa y Carlos Eduardo Cermeño, por hacer inolvidables y memorables mis días de convivencia universitaria.

AGRADECIMIENTOS A

Dios	Por haberme dado la sabiduría para lograr este triunfo.
Mis padres	Roque Manuel Puente Arredondo y Luz Patricia Echeverría de Puente, por su entrega y sacrificio.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el centro formador de grandes profesionales.
Facultad de Ingeniería	Por haberme formado para servir a mi patria.
Mis amigos	Por hacer inolvidables mis días de convivencia universitaria.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Calidad del agua	3
2.2. Principales contaminantes del agua	4
2.2.1. Microorganismos patógenos	4
2.2.2. Desechos orgánicos.....	4
2.2.3. Sustancias químicas inorgánicas.....	5
2.2.4. Nutrientes vegetales inorgánicos.....	5
2.2.5. Compuestos orgánicos	5
2.2.6. Sedimentos y materiales suspendidos	6
2.2.7. Sustancias radiactivas	6
2.2.8. Contaminación térmica	6
2.3. Alteraciones físicas del agua	6
2.3.1. Color.....	7
2.3.2. Olor y sabor.....	7
2.3.3. Temperatura.....	7

2.3.4.	Materiales en suspensión	7
2.3.5.	Radiactividad.....	8
2.3.6.	Espumas	8
2.3.7.	Conductividad	8
2.4.	Alteraciones químicas del agua	8
2.4.1.	pH.....	9
2.4.2.	Oxígeno disuelto	9
2.4.3.	Materia orgánica biodegradable: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	9
2.4.4.	Materiales oxidables: Demanda Química de Oxígeno (DQO)	10
2.4.5.	Nitrógeno total	10
2.4.6.	Fósforo total	10
2.4.7.	Contaminación de aniones	11
2.4.8.	Contaminación de cationes.....	11
2.5.	Métodos generales de tratamiento	11
2.5.1.	Higiénico.....	12
2.5.2.	Estético.....	12
2.5.3.	Económico.....	12
2.6.	Tipos de tratamiento	12
2.6.1.	Tratamiento físico.....	13
2.6.2.	Tratamiento químico	13
2.6.3.	Tratamiento biológico.....	14
2.7.	Proceso de tratamiento	15
2.7.1.	Tratamiento de percloración	15
2.7.2.	Mezcla rápida de coagulación	15
2.7.3.	Sedimentación	16
2.8.	Productos químicos que se utilizan	16

3. DISEÑO METODOLÓGICO	19
3.1. Variables.....	19
3.1.1. Variables independientes.....	19
3.1.2. Variables dependientes.....	20
3.2. Delimitación del campo de estudio	21
3.3. Recurso humano disponible.....	21
3.4. Recursos materiales disponibles	21
3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa	22
3.6. Recolección y reordenamiento de la información	22
3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	23
3.8. Análisis estadístico.....	23
3.8.1. Precisión.....	23
3.8.2. Exactitud.....	24
3.8.3. Rechazo/aceptación de hipótesis planteada	24
3.8.4. Prueba para verificar la hipótesis nula.....	25
3.8.5. Programas a utilizar para análisis de datos	25
4. RESULTADOS.....	27
4.1. Calidad del agua en función de la dosificación utilizada	27
4.2. Costo de operación de cada coagulante en función de la....	29
dosificación	29
4.3. Determinación de los costos totales en función de la dosificación	30
óptima del proceso.....	30
4.4. Ahorro estimado anual al utilizar la dosificación adecuada y el	31
coagulante polihidroxiclورو de aluminio.....	31
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	33
5.1. Logros obtenidos.....	35

CONCLUSIONES 37

RECOMENDACIONES 39

APÉNDICES 43

ANEXOS..... 53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Turbiedad de salida en función de la dosificación del polihidroxiclورو de aluminio.	27
2.	Turbiedad de salida en función de la dosificación del sulfato de aluminio.....	28
3.	Costos totales de operación en función de la dosificación del polihidroxiclورو de aluminio.	30

TABLAS

I.	Variables independientes.....	19
II.	Variables dependientes.	20
III.	Costo mensual de operación del polihidroxiclورو de aluminio.	29
IV.	Costo mensual de operación del sulfato de aluminio.	29
V.	Ahorro estimado anual.....	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm^3	Centímetro cúbico
pKa	Fuerza que tienen las moléculas de disociarse
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
g	Gramos
h	Horas
L	Litro
pH	Medida de acidez o alcalinidad
<	Menor que
mL	Mililitros
mm	Milímetros
M	Molaridad
α	Nivel de confianza
NMP	Número más probable
%	Porcentaje
UV	Rayos ultravioleta
s	Segundos
UFC	Unidades formadoras de colonias

GLOSARIO

Agua potable	Agua para el consumo humano que puede ser consumida sin restricción debido a que, gracias a un proceso de purificación, no representa un riesgo para la salud. El término se aplica al agua que cumple con las normas de calidad promulgadas por las autoridades locales e internacionales.
Coagulación	Proceso por el cual un proceso pierde su liquidez, tornándose similar a un gel en primera instancia y luego sólida, sin experimentar un verdadero cambio de estado.
Contaminación	Es la introducción de sustancias en un medio que provocan que este sea inseguro o no apto para su uso. El medio puede ser un ecosistema, un medio físico o un ser vivo.
Degradación	En química, se refiere a varias reacciones en que las moléculas orgánicas pierden uno o varios átomos de carbono, o donde las moléculas complejas se descomponen en otras más simples.
Sedimentación	Es el proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita. Un tipo común de sedimentación ocurre cuando el material sólido,

transportado por una corriente de agua se deposita en el fondo de un río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

Solidificación

Es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido, producido por una disminución en la temperatura o por una compresión de este material. Es el proceso inverso a la fusión, y sucede a la misma temperatura.

Turbidez

Es la falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido (generalmente se hace referencia al agua), más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua, cuanto más turbia, menor será su calidad.

RESUMEN

El presente diseño de investigación tiene como objetivo evaluar la sustitución del sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) por el polihidroxicloruro de aluminio ($\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) en la planta de tratamiento de agua “Las Ilusiones”, EMPAGUA, evaluado a escala laboratorio.

Las variables independientes que se utilizaron para el análisis preliminar son: temperatura, tiempo de extracción, volumen de disolvente extractor, tamaño de partícula de la muestra y su porcentaje de humedad. Las variables dependientes a considerar fueron densidad del aceite fijo extraído, porcentaje de rendimiento extractivo, volumen de aceite extraído, perfil de ácidos grasos, índices de yodo, peróxidos, acidez y saponificación.

El trabajo se llevó a cabo en tres etapas: en la primera se determinó el rendimiento del sulfato de aluminio y la caracterización del mismo. En la segunda se realizó la evaluación del polímero. En la tercera etapa se llevó a cabo el análisis de los índices de calidad y se compararon los resultados de ambos para realizar la sustitución.

Se determinó la dosis óptima de los coagulantes en función de la turbiedad y el color, siendo de 15 mg por litro para el polímero y de 43 mg por litro para el sulfato de aluminio. Dichos puntos determinan el punto de equilibrio óptimo entre la calidad del agua y su dosificación.

Se elaboró la gráfica con costos fijos y variables, siendo de Q250 000,00 para los 15 mg de polímero por litro y una reducción de costos de Q262 949,48.

Para realizar las pruebas requeridas se contó con la infraestructura del laboratorio de la planta de tratamiento “Las Ilusiones”, EMPAGUA.

OBJETIVOS

General

Determinar la dosis óptima del coagulante, sulfato de aluminio o polihidroxiclورو de aluminio, en función de la turbiedad y el color, para la potabilización del agua en la planta de tratamiento “Las Ilusiones”, EMPAGUA.

Específicos

1. Determinar el punto de equilibrio óptimo entre la calidad del agua y la dosificación.
2. Establecer los costos de operación por cada uno de los coagulantes en función de la dosificación.
3. Elaborar gráficas con costos fijos y variables para la obtención del punto de equilibrio.
4. Determinar la reducción de costos en la compra de coagulante polihidroxiclورو de aluminio.

HIPÓTESIS

Hipótesis nula:

La dosificación del tratamiento del agua está influenciada por el producto químico a utilizarse.

Ho: No existe diferencia significativa entre la dosificación utilizada de sulfato de aluminio y polihidroxiclورو de aluminio.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Donde:

μ_1 = dosificación utilizada del sulfato de aluminio

μ_2 = dosificación utilizada del polihidroxiclورو de aluminio

Hipótesis alternativa Ha:

Existe una diferencia significativa entre la dosificación utilizada de sulfato de aluminio y polihidroxiclورو de aluminio.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Donde:

μ_1 = dosificación utilizada del sulfato de aluminio

μ_2 = dosificación utilizada del polihidroxiclورو de aluminio

INTRODUCCIÓN

En la presente fase de investigación se tendrá un marco conceptual donde se definirán algunos conceptos sobre operación de los equipos; luego se verán algunos antecedentes sobre las auditorías del equipo de dosificación en la planta; después se definirá el porqué de la sustitución del sulfato de aluminio que se utiliza en los equipos y la implementación del nuevo compuesto. Se definirán los objetivos de la investigación, tanto el general como los específicos; también se tendrá un listado de los logros que se espera obtener al finalizar el proyecto.

Por otro lado, se establecerán las variables del problema, tanto independientes como dependientes; también se tendrá una delimitación del campo de estudio, tanto humana como geográfica.

La parte fundamental del proyecto consistirá en la investigación de un punto de equilibrio para el uso del nuevo compuesto que se pueda utilizar en lugar del sulfato de aluminio y poder evaluar el control de calidad y buena dosificación de dicho compuesto para el tratamiento de agua en la ciudad de Guatemala, en la planta de tratamiento “Las Ilusiones”, ubicada en la zona 18 de la ciudad capital, perteneciente a la Empresa Municipal de Agua de la ciudad capital.

Finalmente, se efectuó la consulta bibliográfica de manuales de mantenimiento, específicamente. Al final del informe se diseñará una tabla de los requisitos académicos para la realización de dicho proyecto, y se elaborará un diagrama de causa-efecto.

1. ANTECEDENTES

El agua es esencial para la vida y todos deben disponer de un abastecimiento satisfactorio (suficiente, salubre y accesible); además la mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud, por lo tanto debe garantizarse que el agua sea lo más libre posible de contaminantes, siendo esto el objetivo principal que busca la Empresa Municipal de Agua de la ciudad de Guatemala (EMPAGUA).

El agua puede contener una variedad de impurezas solubles e insolubles; entre estas últimas se destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general; estas partículas son las encargadas de formar la turbiedad y el color. Para que estas sustancias puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación-floculación.

El proceso de coagulación-floculación consiste en que las partículas coloidales presentes en el agua se aglomeren formando pequeños gránulos con un peso específico superior al del agua llamados floc.

En la coagulación ocurre la desestabilización de estas partículas suspendidas, o sea la remoción de las fuerzas que las mantienen separadas, mientras que en el proceso de floculación ocurre el transporte de ellas dentro del líquido, para que las partículas ya desestabilizadas choquen unas con otras y con esto formen coágulos mayores; de esta forma las partículas sedimentan y ocurre la remoción de los materiales en suspensión, lo que permite que el agua

alcance la características físicas y organolépticas idóneas para ser llamada potable.

El principal objetivo de la potabilización del agua es la protección de la salud pública, eliminando o reduciendo a una concentración mínima los componentes peligrosos. Las plantas potabilizadoras de agua deben garantizar su calidad para que esta pueda ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud.

2. MARCO TEÓRICO

El agua es un recurso natural cuya finitud y vulnerabilidad resultan de fundamental importancia, ya que sin ella no podría existir la vida en el planeta. Además, tiene un papel vital en el desarrollo de las comunidades; es indispensable que su abastecimiento sea seguro para que una comunidad se establezca permanentemente. El concepto de agua como un recurso natural que debe administrarse cuidadosamente es esencial; a menos que se tomen medidas para un manejo racional, las poblaciones en desarrollo y los complejos industriales tendrán demandas de agua siempre crecientes.

2.1. Calidad del agua

El agua tiene una composición precisa de una molécula de oxígeno y dos de hidrógeno (H_2O), por lo que es más fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, saber definir cuáles son los contaminantes es difícil. Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura; en la naturaleza se le puede hallar con otros compuestos disueltos en ella, básicamente sales minerales.

La calidad del agua no es un término absoluto, sino que es un concepto que tiene relación con el uso o actividad a que se destina: agua potable, uso industrial, recreación, riego, conservación de la vida acuática, entre otros. Dependiendo del uso, el agua debe de cumplir los siguientes requisitos:

- Uso doméstico: turbidez, sólidos disueltos, coliformes y compuestos tóxicos (metales y pesticidas).

- Uso industrial: sólidos disueltos y en suspensión.
- Uso riego: sólidos disueltos, metales pesados, sulfatos y coliformes.
- Uso recreacional: turbidez, tóxicos y coliformes.
- Uso conservación de la vida acuática: oxígeno disuelto, pH, compuestos órgano-clorados, pesticidas y metales pesados.

2.2. Principales contaminantes del agua

Hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar en los siguientes ocho grupos:

2.2.1. Microorganismos patógenos

Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, entre otras. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños.

Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes. La OMS recomienda que en el agua para beber debe haber 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.

2.2.2. Desechos orgánicos

Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, entre otros. Incluyen heces y otros materiales que pueden

ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto (OD) en agua, o la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno).

2.2.3. Sustancias químicas inorgánicas

En este grupo están incluidos los ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.

2.2.4. Nutrientes vegetales inorgánicos

Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos, provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.

2.2.5. Compuestos orgánicos

Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, entre otros, acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo; porque al ser

productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.

2.2.6. Sedimentos y materiales suspendidos

Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, rías y puertos.

2.2.7. Sustancias radiactivas

Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua, y a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.

2.2.8. Contaminación térmica

El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses, con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

2.3. Alteraciones físicas del agua

Entre las principales alteraciones físicas del agua se pueden mencionar:

2.3.1. Color

El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos debido, principalmente, a los compuestos húmicos, férricos o los pigmentos verdes de las algas que contienen. Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores, pero, en general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.

2.3.2. Olor y sabor

Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos, pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.

2.3.3. Temperatura

El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14 °C. Las centrales nucleares, térmicas y otras industrias contribuyen a la contaminación térmica de las aguas, a veces de forma importante.

2.3.4. Materiales en suspensión

Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable

(disoluciones coloidales); o en suspensión que solo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente solo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas).

2.3.5. Radiactividad

Las aguas naturales tienen unos valores de radiactividad, debido sobre todo a isótopos del K. Algunas actividades humanas pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos.

2.3.6. Espumas

Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuyen mucho el poder autodepurador de los ríos al dificultar la actividad bacteriana. También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.

2.3.7. Conductividad

El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos. Como la temperatura modifica la conductividad, las medidas se deben hacer a 20 °C.

2.4. Alteraciones químicas del agua

Entre las principales alteraciones químicas están:

2.4.1. pH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO_2 disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales y por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO_2 , formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato.

Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, entre otros.

2.4.2. Oxígeno disuelto

Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

2.4.3. Materia orgánica biodegradable: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)

DBO_5 es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuánto oxígeno será necesario para la depuración de esas

aguas y comprobar cuál está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta.

2.4.4. Materiales oxidables: Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas, y en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO, por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto, y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.

2.4.5. Nitrógeno total

Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (Nitrógeno Total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.

2.4.6. Fósforo total

El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico.

La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos, que son los que se determinan por análisis químico.

2.4.7. Contaminación de aniones

- Cloruros: indican salinidad
- Nitratos: indican contaminación agroindustrial
- Nitritos: indican contaminación bacteriológica
- Fosfatos: indican contaminación de detergentes y fertilizantes
- Sulfuros: indican contaminación bacteriológica anaeróbica
- Cianuros: indican contaminación de origen industrial

2.4.8. Contaminación de cationes

- Sodio: indica salinidad.
- Calcio y magnesio: están relacionados con dureza del agua.
- Amonio: indica contaminación con fertilizantes y heces.
- Metales pesados: son de efecto muy nocivo; se bioacumulan en la cadena trófica.
- Compuestos orgánicos: los aceites y grasas procedentes de restos de alimentos o de procesos industriales (automóviles, lubricantes, entre otros) son difíciles de metabolizar por las bacterias y flotan formando películas en el agua que dañan a los seres vivos.

2.5. Métodos generales de tratamiento

Los objetivos del tratamiento para mejorar la calidad del agua de abastecimiento son de los siguientes tipos:

2.5.1. Higiénico

Remover bacterias y elementos venenosos o nocivos, así como resolver la mineralización excesiva y las concentraciones elevadas de compuestos orgánicos, protozoarios y otros microorganismos.

2.5.2. Estético

Corregir el color, la turbidez, el olor y el sabor.

2.5.3. Económico

Reducir la corrosividad, la dureza, el color, la turbidez; reducir las concentraciones de hierro y manganeso; resolver problemas de olor y sabor, entre otros.

2.6. Tipos de tratamiento

El agua cruda contiene diversas sales, así como materiales orgánicos microscópicos, tales como: grava, arena gruesa, arena fina, arcilla, bacterias, partículas coloidales, entre otros. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo algunos procesos de tratamiento para purificar el agua y ponerla en óptimas condiciones para el consumo humano.

Hay distintos tipos de tratamiento de las aguas residuales para lograr retirar contaminantes. Se pueden usar desde sencillos procesos físicos como la sedimentación, en la que se deja que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta complicados procesos químicos, biológicos o térmicos. A continuación se enlistan los más usuales:

2.6.1. Tratamiento físico

- Sedimentación
- Flotación natural o provocada con aire.
- Filtración con arena, carbón, cerámicas, entre otros.
- Evaporación
- Adsorción con carbón activo, zeolitas, entre otros.
- Desorción (*stripping*): se transfiere el contaminante al aire (amoníaco)
- Extracción con líquido disolvente que no se mezcla con el agua

2.6.2. Tratamiento químico

- Coagulación-floculación: agregación de pequeñas partículas usando coagulantes y floculantes (sales de hierro, aluminio, polielectrolitos, entre otros).
- Precipitación química: eliminación de metales pesados, haciéndolos insolubles con la adición de lechada de cal, hidróxido sódico u otros que suben el pH.
- Oxidación-reducción: con oxidantes como el peróxido de hidrógeno, ozono, cloro, permanganato potásico o reductor como el sulfito sódico.
- Reducción electrolítica: provocando la deposición en el electrodo del contaminante. Se usa para recuperar elementos valiosos.
- Intercambio iónico: con resinas que intercambian iones. Se usa para quitar dureza al agua.

- Ósmosis inversa, haciendo pasar al agua a través de membranas semipermeables que retienen los contaminantes disueltos.

2.6.3. Tratamiento biológico

Usan microorganismos que se nutren con diversos compuestos de los que contaminan las aguas. Los flóculos que se forman por agregación de microorganismos son separados en forma de lodos; entre estos se tienen:

- Lodos activos: se añade agua con microorganismos a las aguas residuales en condiciones aerobias (burbujeo de aire o agitación de las aguas).
- Filtros bacterianos: los microorganismos están fijos en un soporte sobre el que fluyen las aguas a depurar. Se introduce oxígeno suficiente para asegurar que el proceso es aerobio.
- Biodiscos: intermedio entre los dos anteriores. Grandes discos dentro de una mezcla de agua residual con microorganismos facilitan la fijación y el trabajo de los microorganismos.
- Lagunas aireadas: se realiza el proceso biológico en lagunas de grandes extensiones.
- Degradación anaerobia: procesos con microorganismos que no necesitan oxígeno para su metabolismo.

2.7. Proceso de tratamiento

Los procesos de tratamiento son los siguientes:

- Percloración
- Mezcla rápida de coagulación
- Sedimentación

2.7.1. Tratamiento de percloración

La percloración es un proceso que consiste en la aplicación de cloro al agua antes de cualquier otro tratamiento. Los beneficios que se obtienen por este procedimiento son los siguientes:

- Mejoría en el proceso de coagulación.
- Reducción de materia en suspensión causante de sabor y olor por oxidación, retardando su descomposición en los sedimentadores.

2.7.2. Mezcla rápida de coagulación

La coagulación significa unir; es el resultado de la desestabilización de cargas eléctricas de los coloides por la adición de los productos químicos. Los coloides poseen cargas eléctricas que mantienen las mismas en repulsión, reduciendo o neutralizando estas cargas eléctricas se pueden unir y entrar en contacto.

Después de ese fenómeno ocurre la floculación, en la cual se forman partículas sedimentables a partir de la unión de partículas desestabilizadas.

Las partículas coloidales, después de ser desestabilizadas permiten ser reunidas para formar partículas más densas y mayores. La agitación en esta fase debe ser controlada de tal forma que permita un contacto físico entre las partículas, para provocar un agrupamiento y también para no romper o disgregar aquellos flóculos ya formados en una agitación muy lenta, con poca energía; los flóculos formados tenderán a sedimentar en las cámaras de floculación y no en el tanque sedimentador.

2.7.3. Sedimentación

Después de la etapa de floculación el agua entra a los sedimentadores, los cuales tienen la función de "sedimentar" las partículas en suspensión en el agua que fueron aglomeradas en la fase anterior. Por eso un sedimentador no es más que un tanque donde la velocidad de escurrimiento horizontal del agua es bastante baja para permitir por gravedad la sedimentación de las partículas.

2.8. Productos químicos que se utilizan

En el proceso de tratamiento se utilizan diversos tipos de materiales químicos para la purificación de agua; a continuación se explica detalladamente la composición de los mismos así como su función en el proceso; los materiales químicos son los siguientes:

- Sulfato de aluminio: está destinado para tratar la turbiedad del agua.
- Polihidroxicloruro de aluminio: tiene la misma función que el sulfato de aluminio, es usado para altas turbiedades; su costo es más alto en relación con el del sulfato de aluminio.

- Sulfato de cobre: es el material químico que permite eliminar las algas.
- Cal hidratada: es aplicada para obtener un PH óptimo de coagulación y floculación, y corregir la acidez del agua para que pueda utilizarse en el consumo humano.
- Cloro gaseoso: es el elemento que elimina la contaminación bacteriológica.
- Hipoclorito: es el cloro granular, por consiguiente, tiene la misma función del cloro gaseoso.
- Fluoruro de sodio: es aplicado para prevenir las caries.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables se refieren a una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de adoptar diferentes valores, los cuales pueden medirse u observarse.

3.1.1. Variables independientes

Son aquellas variables cuyo valor no depende de otro. Se refieren a aquella característica o propiedad que se supone es la causa del fenómeno estudiado. En investigación experimental se llama así a la variable que el investigador manipula.

Tabla I. Variables independientes

Núm.	Variable	Símbolo matemático	Dimensional (Si)	Descripción
1	Turbidez del agua de entrada			Se medirá la turbidez de entrada.
2	Concentración del floculante	C	g/L	Se realizará una solución matriz del floculante.

Continuación de la tabla I.

3	Tiempo de retención	T	t	Se tomarán los mismos tiempos para todas las pruebas de jarras realizadas a distintas turbiedades de entrada.
4	Volumen	L	V	Se utilizará durante las pruebas el mismo volumen de agua.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables dependientes

Son aquellas cuyo valor numérico dependen de los valores que tomen otras variables.

Tabla II. Variables dependientes

Núm.	Variable	Símbolo matemático	Dimensional (Si)	Descripción
1	Turbidez de salida	-	-	Se medirá la turbidez de salida del agua.
2	Dosificación del floculante	-	-	Se realizará a partir de la concentración matriz y de la turbidez de entrada del caudal.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente trabajo se realizó en la Planta de Tratamiento de Agua Las Ilusiones de la Empresa Municipal de Agua de Guatemala -EMPAGUA- ubicada en la colonia “Las Ilusiones”, zona 18, en el periodo de tiempo de octubre del 2014 a marzo del 2015, utilizando como muestras para trabajar el agua que ingresaba de la presa de agua El Atlántico.

3.3. Recurso humano disponible

Investigador: Manuel Roberto Puente Echeverría

Asesor: Ing. Qco. Miguel Arnoldo Lemus Gudiel

Asesor: Ing. Víctor Manuel Paz

3.4. Recursos materiales disponibles

- Equipo de medición
 - Balanza analítica
 - Turbidímetro
- Reactivos de laboratorio
 - Sulfato de aluminio
 - Polihidroxiclورو de aluminio
- Instrumentos de laboratorio
 - *Beacker* de 2 L
 - *Beacker* de 1L
 - *Beacker* de 0,5 L
 - Balón aforado de 200 mL

- Balón aforado de 100 mL
- Pipeta cerológica de 1 mL
- Pipeta cerológica de 2 mL
- Pipeta cerológica de 5 mL
- Pipeta cerológica de 10 mL
- Pipeta volumétrica de 45 mL

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se utilizó una técnica cualitativa. Esta fue utilizada para determinar la turbidez del agua, por medio de la prueba de jarras, ya que se trabajaron a diferentes concentraciones del coagulante y turbiedades de entrada de agua; de esta manera se determinó la dosificación óptima del polímero. Los resultados se determinaron por medio del turbidímetro.

3.6. Recolección y reordenamiento de la información

La recolección de la información se realizará mediante cuadernos de trabajo y bitácoras de trabajo en laboratorio. Estas deberán indicar día, fecha, fase del proyecto y cualquier dato que sirva como guía de la información anotada en cada página. Deben estar numeradas y registradas con el formato que el laboratorio de la empresa exige. En la parte de atrás debe contener un índice detallado. Luego será trasladada a la computadora para almacenar de forma digital y procesar los datos obtenidos para la respectiva obtención de resultados, análisis de avance deseado y cualquier ajuste que sea necesario realizar.

El ordenamiento de la información se realizará con ayuda de tablas y gráficas proporcionadas por un programa de computadora. Siendo en este caso Excel.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La tabulación se realizará colocando variables evaluadas obtenidas para cada campo específico. Las tablas contendrán información numérica detallada.

El ordenamiento y procesamiento de la información se realizará utilizando una computadora y sus distintas herramientas para estos usos. Esta se realizará según el avance del proyecto lo requiera. La información ya procesada es la base para continuar con las siguientes fases de la experimentación.

3.8. Análisis estadístico

Este se realizará tomando en cuenta la precisión y exactitud para que los datos sean confiables.

3.8.1. Precisión

Se evaluará la precisión de todos los datos por medio del coeficiente de variación:

$$\sigma = \frac{s}{\bar{x}} * 100$$

Donde:

σ = coeficiente de variación

s = desviación estándar de la media

\bar{x} = media

3.8.2. Exactitud

Se evaluará la exactitud de los datos de dos maneras diferentes: para los datos físicos e índices de calidad se utilizará el procedimiento de comparación de una media experimental con un valor conocido y para comprobación de la hipótesis se utilizará un análisis de varianzas. Para todos los casos se considerará una confiabilidad del 95 %.

$$t = (\bar{x} - \mu)\sqrt{n}/s$$

Donde:

t = t de Student

\bar{x} = media

μ = dato teórico

n = número de repeticiones

s = desviación

3.8.3. Rechazo/aceptación de hipótesis planteada

Se calculará la variación dentro de la muestra utilizando la ecuación de cuadrados medios:

$$s_2^2 = \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / h(n - 1)$$

Donde:

s_2^2 = media cuadrática dentro de la muestra (error cuadrático medio)

x_{ij} = repetición j de la muestra i

$\overline{x_i}$ = media de la muestra i

n = número de repeticiones

h = número de muestras

$h(n - 1)$ = grados de libertad

3.8.4. Prueba para verificar la hipótesis nula

Si la hipótesis nula es correcta, la variación entre ambas estimaciones de σ_0^2 no debería ser significativa. Esto se comprueba mediante una prueba F de una cola.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

Donde:

s_1^2 = media cuadrática entre muestras (media cuadrática del tratamiento)

s_2^2 = media cuadrática dentro de la muestra (error cuadrático medio)

3.8.5. Programas a utilizar para análisis de datos

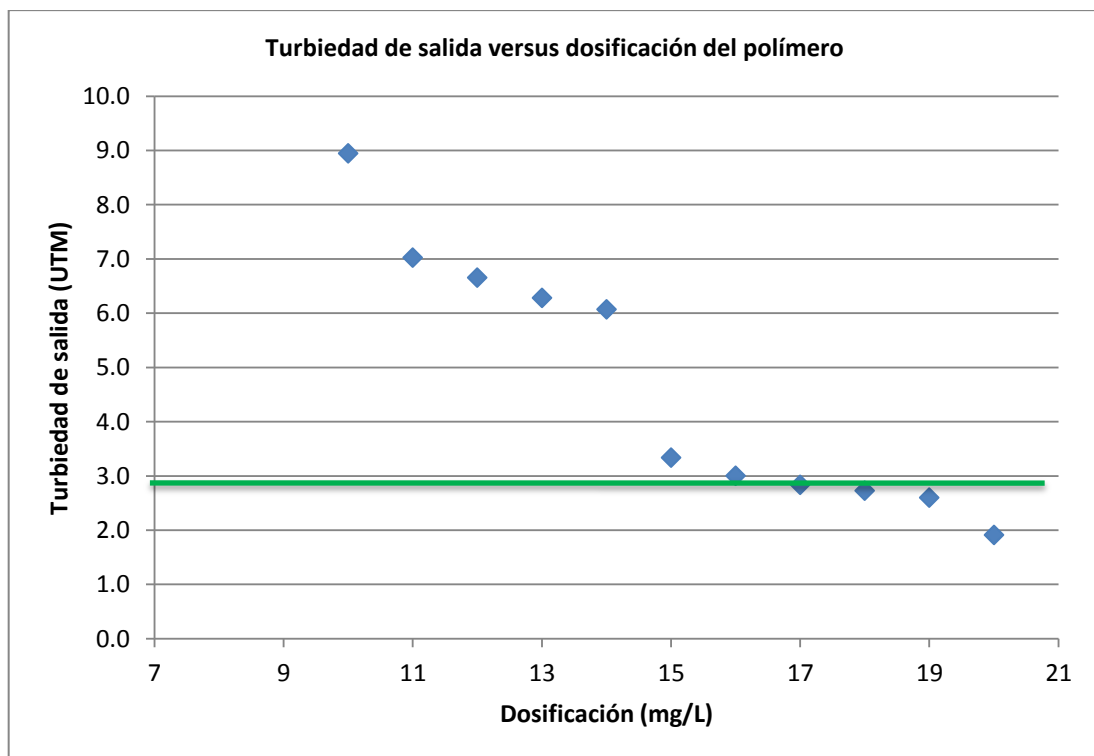
Se utilizó el programa de Microsoft Excel para manejo de datos estadísticos y el análisis e interpretación de los mismos, así como para la creación de las gráficas correspondientes.

4. RESULTADOS

4.1. Calidad del agua en función de la dosificación utilizada

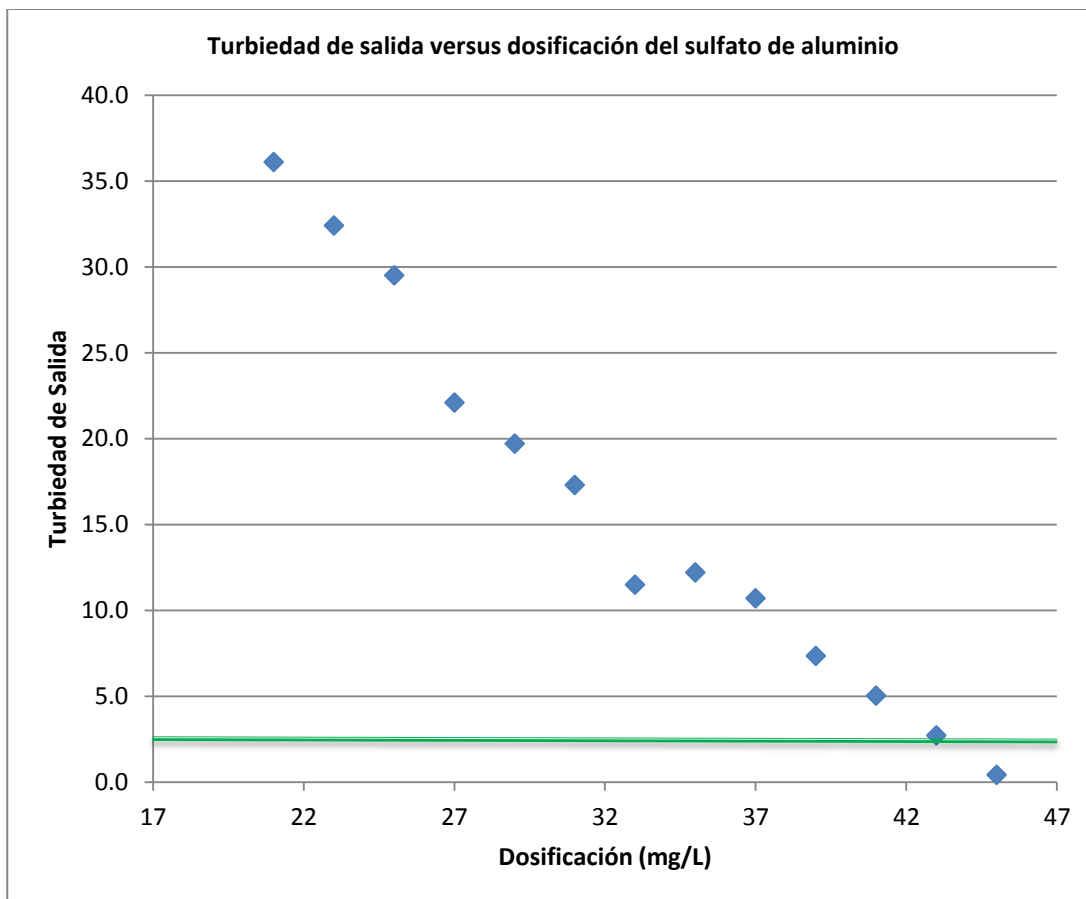
La calidad del agua se determina a partir de la turbiedad que presenta el agua al salir de la etapa de sedimentación, se tiene como parámetro de aceptabilidad una turbiedad de 3,5.

Figura 1. **Turbiedad de salida en función de la dosificación del polihidroxicloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Turbiedad de salida en función de la dosificación del sulfato de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Costo de operación de cada coagulante en función de la dosificación

Se determinó la dosificación óptima en la dosificación de polihidroxiclورو de aluminio y del sulfato de aluminio y la representación de su respectivo costo.

Tabla III. **Costo mensual de operación del polihidroxiclورو de aluminio**

Núm.	Dosis (mg/L)	Turbiedad salida (UTM)	Caudal entrada (L/s)	Sacos/día	Costo/saco (Q/Saco)	Costo mensual (Q/mes)
1	15	3.34	230	11,92	Q167,50	Q59 914,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Costo mensual de operación del sulfato de aluminio**

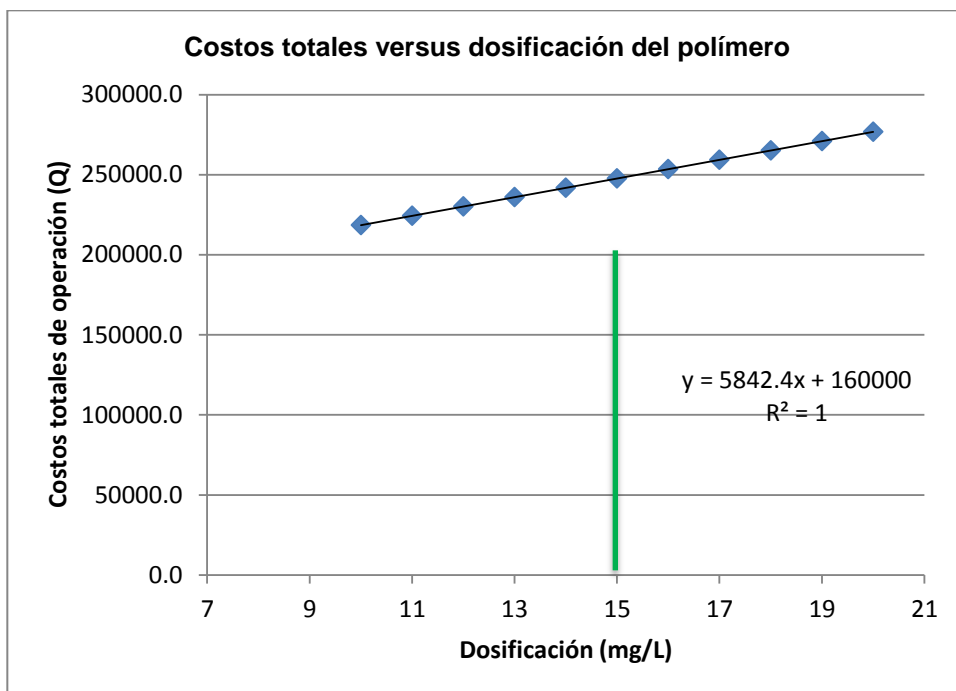
Núm.	Dosis (mg/L)	Turbiedad salida	Caudal entrada (L/s)	Sacos/día	Costo/saco (Q/Saco)	Costo mensual (Q/mes)
1	43	2.73	230	34,18	Q79,80	Q81 826,54

Fuente: elaboración propia.

4.3. Determinación de los costos totales en función de la dosificación óptima del proceso

Mediante la determinación de la dosificación óptima de operación, se calcularon los costos totales que incluyen el gasto energético como el costo del recurso humano que opera en dicha planta de tratamiento.

Figura 3. **Costos totales de operación en función de la dosificación del polihidroxicloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Ahorro estimado anual al utilizar la dosificación adecuada y el coagulante polihidroxiclورو de aluminio

En la siguiente tabla se analizan las dosis adecuadas y el coagulante necesario para la experimentación realizada.

Tabla V. **Ahorro estimado anual**

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad de salida (UTM)	Costo anual (Q)
Polihidroxiclورو de aluminio	15	3.34	Q 718 968,96
Sulfato de aluminio	43	2.73	Q 981 918,44
Ahorro estimado anual (Q)			Q 262 949,48

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La calidad del agua se puede determinar de distintas maneras, dependiendo de cuál sea el caso y para qué se va a utilizar dicha agua. En la planta de tratamiento de agua “Las Ilusiones”, el parámetro utilizado es el de la turbiedad del agua en la salida del proceso, a la vez se verifica de igual manera lo que es el cloro libre, la dureza, alcalinidad, color, los carbonatos y sulfatos.

Durante la experimentación hubo variaciones considerables de la turbiedad del agua en la entrada a la planta, así como el color que entraba en el agua, al final de cuentas el color en el agua era un tanto despreciable ya que el polihidroxiclورو de aluminio neutralizaba todo debido a que parte de las propiedades de este polímero es el ataque a las partículas de color, por lo cual para determinar una dosificación óptima el parámetro utilizado es la turbiedad en el agua.

En la elaboración de las gráficas 1 y 2 se utilizaron datos obtenidos en el transcurso de los 6 meses del EPS; en estos la turbiedad de entrada oscilaba en el intervalo de [7, 200] UTM; sin embargo luego de realizar las pruebas de jarras para determinar la dosificación óptima, los resultados eran muy parecidos, sin importar la turbiedad inicial con la que se trabajara.

Se realizó un promedio de turbiedades de salida en función de la dosificación del polímero aplicada (mg/L), y en donde los resultados determinan que la dosificación óptima es de 15 mg/L de polihidroxiclورو de aluminio y de 43 mg/L para el sulfato de aluminio, ya que con esta dosificación aplicada, el agua salía de los tanques de sedimentación con una turbiedad de 3.5, la cual

era rebajada en el paso por los filtros, ya que al salir de estos, el agua tenía una turbiedad final menor a 1, y con esto ya cumple con los requisitos necesarios para poder ser catalogada como agua potable.

Como parte del trabajo realizado se determinaron los costos del sulfato de aluminio y del polihidroxiclورو de aluminio para todas las corridas con las diferentes dosificaciones utilizadas; puede apreciarse que a partir del caudal con el que trabaja la planta de tratamiento, se realiza el cálculo de los sacos de coagulante que son requeridos y los costos que estos representan mensualmente a Empagua, siendo de Q59 914,08 para el polihidroxiclورو de aluminio y de Q81 826,54 para el sulfato de aluminio. Puede observarse una diferencia de Q21 912,46 mensuales con el uso del polímero, dando un ahorro mensual del 27 %.

Mediante la determinación de la dosificación óptima de operación y el coagulante que trabaja con mayor efectividad para las condiciones de la planta de tratamiento, se calcularon los costos totales que incluyen el gasto energético como el costo del recurso humano que opera en dicha planta de tratamiento; en parte el costo de operación es constante debido a que el caudal de trabajo también permanece constante, por lo que el costo energético que se utiliza para la dosificación del coagulante es despreciable, ya que las bombas encargadas de impulsar la solución de coagulante son despreciables con las utilizadas en la distribución del agua.

A partir de esto solamente queda calcular el ahorro que puede producirse en un año al aplicar como coagulante el polihidroxiclورو de aluminio en sustitución del que se aplicaba con anterioridad, que era el sulfato de aluminio; las dosis óptimas de cada uno son de 15 y 43 mg/L, respectivamente, y los costos de compra individuales de cada uno de los coagulantes son de Q167,50

y Q79,80 por saco, respectivamente; con esto se obtiene un ahorro aproximado de Q262 949,48; esto es porque la dosificación del polihidroxiclورو de aluminio es aproximadamente un tercio de lo que se debería aplicar con el sulfato de aluminio.

Con esto también se obtiene el ahorro de la fricción generada por las bombas al trasladar la solución con una concentración sobresaturada del sulfato de aluminio, y no forzar el equipo como se estaba realizando con anterioridad. Con dicho cambio de coagulante se puede observar un 27 % de ahorro anual dentro del actual presupuesto asignado para la compra de productos para el tratamiento de agua de la planta “Las Ilusiones”.

5.1. Logros obtenidos

- Se utilizó la metodología que consiste en aplicar una dosificación óptima del polihidroxiclورو de aluminio para obtener agua de mejor calidad.
- Se realizó una curva de calibración del sulfato de aluminio y del polihidroxiclورو de aluminio.
- Se efectuó la calibración del rotámetro que se emplea en la dosificación del coagulante.
- Se determinó la dosificación óptima del polihidroxiclورو de aluminio y del sulfato de aluminio.
- Se comprobó que al aplicar una concentración óptima en el tratamiento del agua, se tendría un ahorro aproximado de Q262 949,48 anualmente.

CONCLUSIONES

1. Se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio y polihidroxicloruro de aluminio, como coagulantes, siendo de 15 y 43 mg/L, respectivamente.
2. Se encontró el punto de equilibrio óptimo entre la calidad del agua y la dosificación a partir de los datos obtenidos en todas las pruebas de jarras realizadas con el polímero, dando un resultado de 15 mg/L.
3. Se establecieron los costos de operación por cada uno de los coagulantes, incluyendo costo energético y de recurso humano. El costo total para el polímero es de Q219 914,08 y de Q 241,826.54 para el sulfato de aluminio.
4. Se determinó la reducción de costos en la buena dosificación del polímero, esto teniendo un impacto directo en las compras del coagulante. Se calculó un ahorro de Q 262,949.49 anuales.

RECOMENDACIONES

1. Elaborar la solución madre a una concentración menor de la utilizada actualmente, ya que esto dificulta la correcta lectura en el rotámetro de dosificación.
2. Implementar un sistema nuevo de dosificación para garantizar una correcta homogeneización entre el coagulante y el agua a tratar.
3. Implementar un equipo de seguridad industrial y capacitaciones al personal operativo sobre manipulación y almacenamiento correcto de los coagulantes.
4. Desarrollar un correcto sistema de buenas prácticas de laboratorio, con el fin de tener un mayor respaldo y referencias históricas en la variación de la calidad de agua que entra y sale de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

1. BUFFA, Elwood. *Administración y dirección técnica de la producción*. 4a ed. México: LIMUSA, 1977. 671 p.
2. KEMIRA. *Ficha técnica del PAC*. [en línea].
<[http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/PAX-31S%20\(HT\).pdf](http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/PAX-31S%20(HT).pdf)>.
[Consulta: noviembre de 2015].
3. RAMÍREZ PADILLA, David. Noel. *Contabilidad administrativa*. 8a ed. México: McGraw-Hill, 2008. 625 p. ISBN: 978-970-10-6630-0.
4. SAINT-GOBAIN. *Abastecimiento de agua*. [en línea].
<<http://saint-gobain-pam.es/abastecimiento/6-tuberia-y-accesorios>>.
[Consulta: noviembre de 2015].
5. SALAZAR LÓPEZ, Bryan. *Ingeniería industrial*. [en línea].
<<http://www.ingenieriaindustrialonline.com/>>. [Consulta: septiembre de 2015].
6. URL, IARNA. *Diagnóstico de la producción de información estadística ambiental en Guatemala, 2009*. [en línea]. <<http://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=392>>.
[Consulta: agosto de 2015].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Curva de calibración del coagulante utilizado**

La cantidad del reactivo a dosificar se determinó a partir de su curva en función de la densidad y concentración del mismo.

Apéndice 1a. **Datos originales para realizar la curva de calibración del polihidroxicloruro de aluminio**

Gramos	Peso	Densidad	Densímetro
1	152,25	0,99635	1,002
3	152,40	0,99785	1,002
6	152,56	0,99945	1,0035
8	152,79	1,00175	1,006
10	152,86	1,00245	1,01
12	152,99	1,00375	1,008
14	153,11	1,00495	1,008
16	153,26	1,00645	1,01
18	153,42	1,00805	1,012
20	153,51	1,00895	1,01
22	153,66	1,01045	1,012
24	153,76	1,01145	1,014
26	153,93	1,01315	1,015
28	154,07	1,01455	1,016
30	154,06	1,01445	1,018
31	154,13	1,01515	1,019
34	154,10	1,01485	1,02

Continuación del apéndice 1a.

36	154,19	1,01575	1,02
38	154,42	1,01805	1,021
40	154,55	1,01935	1,022
42	154,71	1,02095	1,024
44	154,81	1,02195	1,024
46	154,93	1,02315	1,026
48	154,98	1,02365	1,026
50	155,10	1,02485	1,028
52	155,28	1,02665	1,028
54	155,46	1,02845	1,03
56	155,58	1,02965	1,03
58	155,71	1,03095	1,034
60	155,74	1,03125	1,033
62	155,96	1,03345	1,035
64	156,04	1,03425	1,034
66	156,33	1,03715	1,038
68	156.,53	1,03915	1,04
70	156,68	1,04065	1,04
72	156,72	1,04105	1,04
73	156,83	1,04215	1,041
76	156,87	1,04255	1,043
78	157,04	1,04425	1,044
82	157,24	1,04625	1,046
84	157,39	1,04775	1,046
86	157.5	1,04885	1,048
88	157.77	1,05155	1,05
90	157.89	1,05275	1,05
92	157.91	1,05295	1,05
94	158,12	1,05505	1,053

Continuación del apéndice 1a.

96	158,18	1,05565	1,054
98	158,24	1,05625	1,054
100	158,48	1,05865	1,056

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1b. **Datos originales para realizar la curva de calibración del polihidroxiclورو de aluminio**

Gramos	Peso	Densidad	Densímetro
2	144,72	0,99728333	1,003
4	144,81	0,99818333	1,004
5	144,88	0,99888333	1,0035
7	145,02	1,00028333	,1.0055
9	145,14	1,00148333	1,006
11	145,27	1,00278333	1,009
13	145,40	1,00408333	1,007
15	145,60	1,00608333	1,01
17	145,63	1,00638333	1,012
19	145,64	1,00648333	1,012
21	145,92	1,00928333	1,013
23	146,03	1,01038333	1,012
25	146,21	1,01218333	1,015
27	146,24	1,01248333	1,016
29	146,37	1,01378333	1,018
32	146,51	1,01518333	1019
33	146,48	1,01488333	1,02
35	146,58	1,01588333	1,02

Continuación del apéndice 1b.

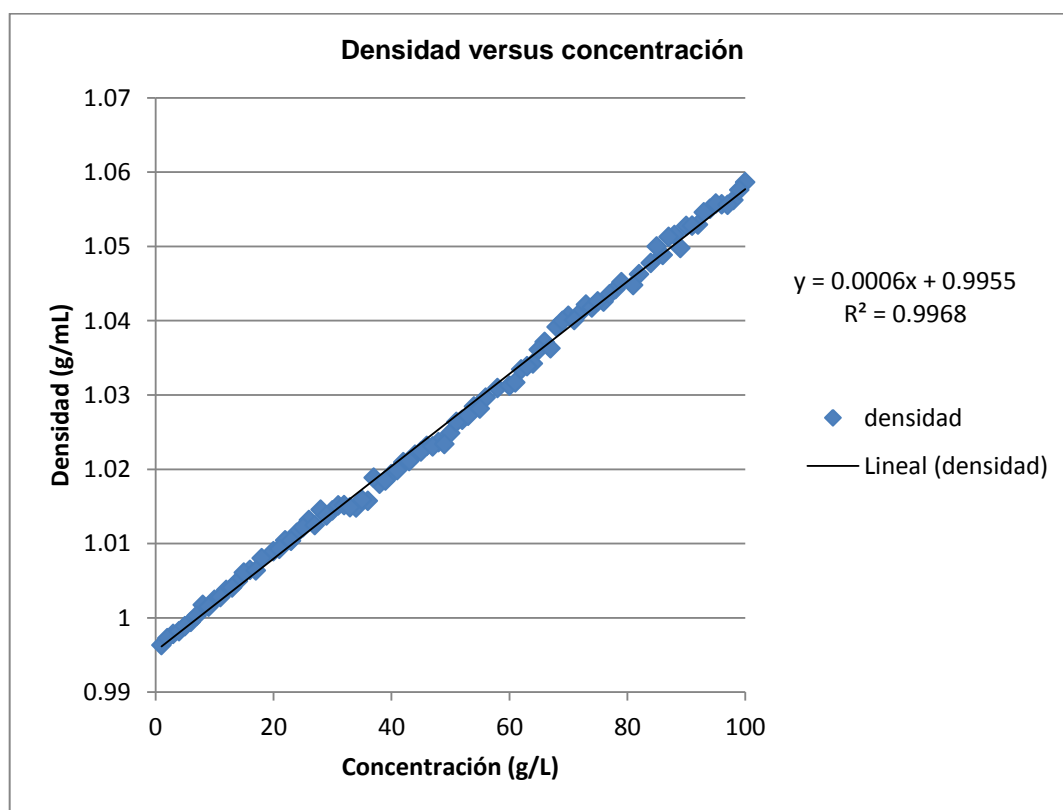
37	146,88	1,01888333	1,021
39	146,84	1,01848333	1,022
41	146,98	1,01988333	1,023
43	147,10	1,02108333	1,024
45	147,23	1,02238333	1,026
47	147,30	1,02308333	1,026
49	147,33	1,02338333	1,028
51	147,63	1,02638333	1,029
53	147,71	1,02718333	1,03
55	147,81	1,02818333	1,03
57	148,21	1,03218333	1,034
59	147,96	1,02968333	1,034
61	148,16	1,03168333	1,034
63	148,38	1,03388333	1,035
65	148,6	1,03608333	1,036
67	148,62	1,03628333	1,038
69	148,99	1,03998333	1,04
71	149	1,04008333	1,04
74	149,17	1,04178333	1,042
75	149,25	1,04258333	1,043
77	149,35	1,04358333	1,043
79	149,51	1,04518333	1,045
81	149,47	1,04478333	1,046
83	149,95	1,04958333	1,046
85	149,99	1,04998333	1,048
87	150,12	1,05128333	1,05
89	149,97	1,04978333	1,05
91	150,27	1,05278333	1,051

Continuación del apéndice 1b.

93	150,45	1,05458333	1,052
95	150,57	1,05578333	1,054
97	150,55	1,05558333	1,054
99	150,75	1,05758333	1,056

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1c. **Curva de calibración del polihidroxiclورو de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1d. **Datos originales para realizar la curva de calibración del sulfato de aluminio**

Gramos	Peso	Densidad	Densímetro
52	154,06	1,01445	1,03
56	155,78	1,03165	1,03
60	155,99	1,03375	1,034
64	156,3	1,03685	1,036
68	156,54	1,03925	1,038
72	156,73	1,04115	1,04
76	157	1,04385	1,042
80	157,14	1,04525	1,042
84	157,35	1,04735	1,046
88	157,61	1,04995	1,05
92	157,87	1,05255	1,05
96	158,12	1,05505	1,052
100	158,17	1,05555	1,055
104	158,48	1,05865	1,057
108	158,77	1,06155	1,06
112	158,89	1,06275	1,061
116	158,96	1,06345	1,062
120	159,25	1,06635	1,065
120	158,98	1,06365	1,066
124	159,19	1,06575	1,066
128	159,46	1,06845	1,067
132	159,70	1,07085	1,071
136	159,90	1,07285	1,072
140	160,15	1,07535	1,074
144	160,39	1,07775	1,075
148	160,47	1,07855	1,079

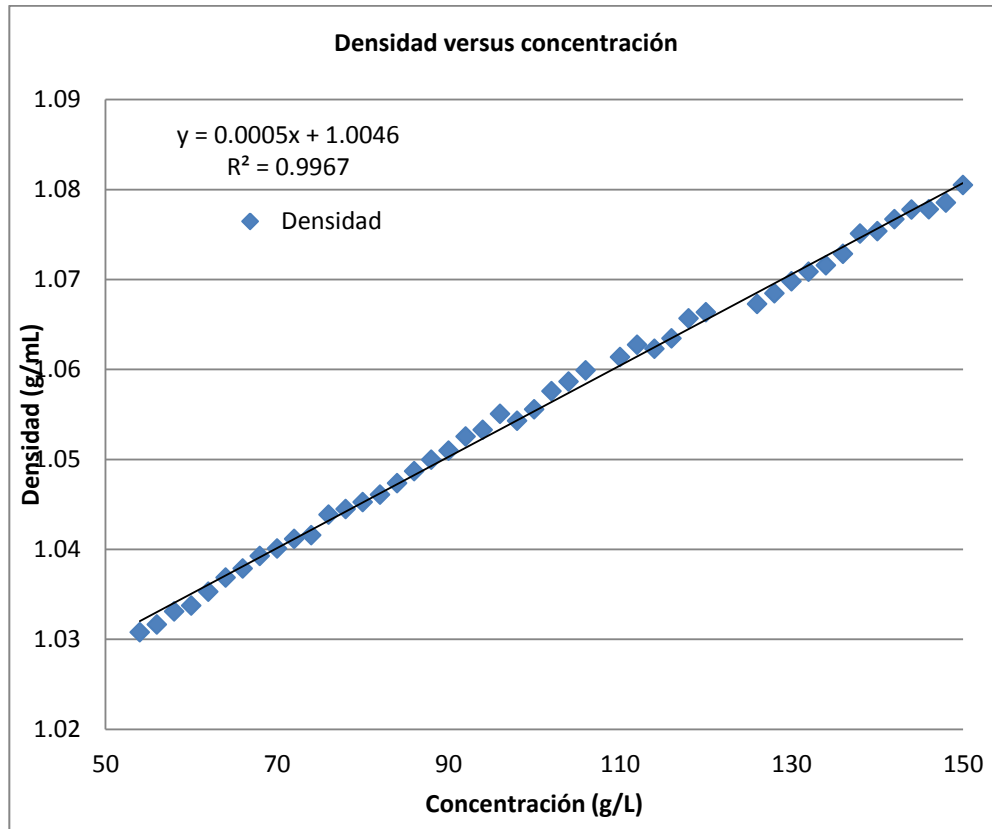
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1e. **Datos originales para realizar la curva de calibración del sulfato de aluminio**

Gramos	Peso	Densidad	Densímetro
50	146,37	1,01378333	1,03
54	148,07	1,03078333	1,03
58	148,3	1,03308333	1,032
62	148,52	1,03528333	1,036
66	148,78	1,03788333	1,038
70	149	1,04008333	1,04
74	149,15	1,04158333	1,042
78	149,44	1,04448333	1,044
82	149,6	1,04608333	1,046
86	149,86	1,04868333	1,048
90	150,09	1,05098333	1,05
94	150,32	1,05328333	1,052
98	150,42	1,05428333	1,054
102	150,75	1,05758333	1,056
106	150,98	1,05988333	1,058
110	151,13	1,06138333	1,06
114	151,22	1,06228333	1,062
118	151,56	1,06568333	1,064
118	151,22	1,06228333	1,065
122	151,39	1,06398333	1,066
126	151,72	1,06728333	1,067
130	151,97	1,06978333	1,07
134	152,15	1,07158333	1,072
138	152,5	1,07508333	1,074
142	152.66	1,07668333	1,075
146	152.77	1,07778333	1,079
150	153,4	1,08048333	1,08

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1f. **Curva de calibración del sulfato de aluminio**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 2. **Calibración del Rotámetro de dosificación**

Se calibró el rotámetro de dosificación por medio del método de cubeteo. Esto garantiza la cantidad que se está dosificando en la entrada de la planta.

Apéndice 2a. **Calibración del rotámetro**

Rotámetro	Kg			Precisión	Exactitud	Tiempo (s)	Densidad	L/min	mg/s	mg/L
	1	2	3							
5	4,3	4,4	4,5	98 %	98 %	30	1.02665	6,43	5625,09	27,0437083
10	7,7	7,7	7,9	99 %	99 %	30		12,99	11363,82	54,633754
20	8,6	7,5	7,5	100 %	95 %	15		26,36	23068,56	110,906521
30	7,3	7,3	6,5	90 %	92 %	10		34,68	30341,4	145,872123
40	9,7	9,3	8,5	91 %	93 %	10		47,14	41250,67	198,320527
50	10,9	10,9	10,7	99 %	99 %	10		56,88	49773,54	239,295843

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2b. **Costo mensual de operación del polihidroxiclورو de aluminio**

Núm.	Dosis (mg/L)	Turbiedad salida (UTM)	Caudal entrada (L/s)	Sacos/día	Costo/saco (Q/Saco)	Costo mensual (Q/Mes)
1	10	8,95	230	7,95	Q167,50	Q39 942,72
2	11	7,02	230	8.74	Q167,50	Q43 936,99
3	12	6,65	230	9.54	Q167,50	Q47 931,26
4	13	6,28	230	10.33	Q167,50	Q51 925,54
5	14	6,07	230	11.13	Q167,50	Q55 919,81
6	15	3,34	230	11.92	Q167,50	Q59 914,08
7	16	3,00	230	12.72	Q167,50	Q63 908,35
8	17	2,84	230	13.51	Q167,50	Q67 902,62
9	18	2,73	230	14.31	Q167,50	Q71 896,90
10	19	2,60	230	15.10	Q167,50	Q75 891,17
11	20	1,91	230	15.90	Q167,50	Q79 885,44

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2c. **Costo mensual de operación del sulfato de aluminio**

Núm.	Dosis (mg/L)	Turbiedad salida	Caudal entrada (L/s)	Sacos/día	Costo/saco (Q/saco)	Costo mensual (Q/mes)
1	25	29,50	230	19,87	Q79,80	Q47 573,57
2	27	22,10	230	21,46	Q79,80	Q51 379,45
3	29	19,70	230	23,05	Q79,80	Q55 185,34
4	31	17,30	230	24,64	Q79,80	Q58 991,22
5	33	11,50	230	26,23	Q79,80	Q62 797,11
6	35	12,20	230	27,82	Q79,80	Q66 603,00
7	37	10,70	230	29,41	Q79,80	Q70 408,88
8	39	7,35	230	31,00	Q79,80	Q74 214,77
9	41	5,04	230	32,59	Q79,80	Q78 020,65
10	43	2,73	230	34,18	Q79,80	Q81 826,54
11	45	0,42	230	35,77	Q79,80	Q85 632,42

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de recolección de datos

Se utilizó la hoja de recolección de datos de la planta “Las Ilusiones” de EMPAGUA.

Anexo 1a. Hoja de recolección de datos

Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala "EMPAGUA"
Dirección de Fuentes de Producción de Agua Superficial
Planta de Tratamiento de Agua Potable "Las Ilusiones"

Análisis de Dosificación en Prueba de Jarras

Fecha: 20/05/2014

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Prueba	Fecha	UTN	Color	pH	Temperatura	Alcalinidad	Conc. Solución
1	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
2	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
3	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
4	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
5	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0
6	20/05/2014	130	6.5	6.6	1.0	1.0	1.0

Fuente: planta “Las Ilusiones”, EMPAGUA.

